

УДК 519.85

Власюк А. П.¹, д.т.н., проф.
Мартинюк П. М.², к. ф.-м. н., доц.

Математичне моделювання фільтраційної консолідації з урахуванням просідань та повзучості скелета ґрунту

Побудовано математичну модель фільтраційної консолідації двофазного ґрунту з урахуванням повзучості та просідань його скелету в умовах впливу тепло-масопереносу. Чисельний розв'язок відповідної одновимірної краєвої задачі знайдено методом радіальних базисних функцій. Як приклад, досліджено задачу фільтраційної консолідації шару ґрунту обмеженої товщини. Наведено результати чисельних експериментів та їх аналіз.

Ключові слова: консолідація, повзучість, радіальні базисні функції.

¹ Національний університет водного господарства та природокористування, 33028, м. Рівне, вул. Соборна, 11,
e-mail: A.P.Vlasyuk@rambler.ru

² Національний університет водного господарства та природокористування, 33028, м. Рівне, вул. Соборна, 11,
e-mail: Martinjuk@ukr.net

Статтю представив д.т.н., проф. Гаращенко Ф. Г.

1. Вступ. При розробці проектів цивільних та промислових споруд, під час їх (споруд) будівництва та експлуатації постає проблема прогнозування процесів ущільнення ґрунтів. Ущільнення повністю насиченого ґрунту, що супроводжується віджиманням рідини з його пор, зазвичай називають процесом фільтраційної консолідації. Тому у повністю насичених або досить вологих глинистих ґрунтах розв'язок задачі ущільнення можна звести до визначення зміни в часі надлишкових напорів у поровій рідині. Отримані розрахунковим шляхом результати, що визначають тривалість і характер ущільнення, залежать як від властивостей і стану ґрунтів, так і від ступеня врахування різних факторів.

Класичні математичні моделі фільтраційної консолідації ґрунтів побудовані в роботах [1-3]. В роботах [4-10] дані моделі були доповненні та

A. P. Vlasyuk¹, Doctor of technical sciences,
P. M. Martinyuk², Candidate of physics and
mathematics sciences

Mathematical modeling of a soil filtration consolidation with taking into account skeleton creep and subsidence

A mathematical model of two-phase soil filtration consolidation problem taking into account of creep of soil skeleton and heat and mass transfer has been formulated. The numerical solution of the corresponding one-dimensional boundary-value problem has been found by the radial basis functions method. As an example, the clayey soil layer infinite width filtration consolidation problem has been investigated. Numerical experiments and their analysis have been carried out.

Key Words: consolidation, creep, radial basis functions

¹ National University of Water Management and Natural Resources Use, 33028, Rivne, Soborna str., 11,
A.P.Vlasyuk@rambler.ru

² National University of Water Management and Natural Resources Use, 33028, Rivne, Soborna str., 11,
e-mail: Martinjuk@ukr.net

вдосконалені. Вдосконалення полягали у врахуванні впливу тепло-солепереносу. Також авторами враховано зміну області консолідації в часі за рахунок просідання скелету ґрунту. Однак, комплексна задача з урахуванням впливу техногенних факторів, повзучості та просідань скелета ґрунту там розглянута не була. Це і є метою та новизною представленої статті.

2. Постановка та математична модель задачі. Математична модель R -вимірної задачі фільтраційної консолідації ґрунтового масиву в області Ω з межею Γ під впливом прикладеного зовнішнього навантаження інтенсивності q з урахуванням повзучості його скелету та впливу переносу солей в неізотермічному режимі, зважаючи на результати робіт [4-10], може бути описана наступною краєвою задачею:

$$\begin{aligned}
 & \frac{(1+e)(1+(R-1)\xi)}{\gamma} \beta_1 \times \\
 & \times [\nabla \cdot (\mathbf{K}_h(c, T, h) \nabla h) - \nabla \cdot (\mathbf{K}_c(c) \nabla c) - \nabla \cdot (\mathbf{K}_T \nabla T)] + \\
 & + \frac{(1+e)(1+(R-1)\xi)}{\gamma} \times \\
 & \times \frac{\partial}{\partial t} [\nabla \cdot (\mathbf{K}_h(c, T, h) \nabla h) - \nabla \cdot (\mathbf{K}_c(c) \nabla c) - \nabla \cdot (\mathbf{K}_T \nabla T)] + \\
 & + \frac{a_0}{\gamma} \frac{\partial^2 (\Theta^* + R\gamma h^*)}{\partial t^2} + \frac{\beta_1}{\gamma} (a_0 + a_1) \frac{\partial (\Theta^* + R\gamma h^*)}{\partial t} = \\
 & = [Ra_0 + \beta(1+e)(1+(R-1)\xi)] \frac{\partial^2 h}{\partial t^2} + \\
 & + [\beta_1 R(a_0 + a_1) + \beta \beta_1 (1+e)(1+(R-1)\xi)] \frac{\partial h}{\partial t}, \mathbf{X} \in \Omega, t > 0, \quad (1)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \nabla \cdot (\mathbf{D}_c(c, T, h) \nabla c) + \nabla \cdot (\mathbf{D}_T \nabla T) - \mathbf{u} \nabla c = \\
 & = n \frac{\partial c}{\partial t} - \gamma_m (C_m - c), \mathbf{X} \in \Omega, t > 0, \quad (2)
 \end{aligned}$$

$$\nabla \cdot (\lambda(c, T) \nabla T) - \rho c_p \mathbf{u} \nabla T = c_T \frac{\partial T}{\partial t}, \mathbf{X} \in \Omega, t > 0, \quad (3)$$

$$\mathbf{u} = -\mathbf{K}_h(c, T, h) \nabla h + \mathbf{K}_c(c) \nabla c + \mathbf{K}_T \nabla T, \quad (4)$$

$$\mathbf{q}_c = \mathbf{u} \cdot \mathbf{c} - \mathbf{D}_c(c, T, h) \nabla c - \mathbf{D}_T \nabla T, \quad (5)$$

$$\mathbf{q}_T = \rho c_p \mathbf{u} \cdot \mathbf{T} - \lambda(c, T) \nabla T, \quad (6)$$

$$(\mathbf{u}, \mathbf{n})|_{\Gamma_1} = 0, h|_{\Gamma_2} = H_1(\mathbf{X}, t), \mathbf{X} \in \Gamma_2, \quad (7)$$

$$(\mathbf{q}_c, \mathbf{n})|_{\Gamma_3} = 0, c|_{\Gamma_4} = C_1(\mathbf{X}, t), \mathbf{X} \in \Gamma_4, \quad (8)$$

$$(\mathbf{q}_T, \mathbf{n})|_{\Gamma_5} = 0, T|_{\Gamma_6} = T_1(\mathbf{X}, t), \mathbf{X} \in \Gamma_6, \quad (9)$$

$$h(\mathbf{X}, 0) = h_0(\mathbf{X}), c(\mathbf{X}, 0) = C_0(\mathbf{X}), T(\mathbf{X}, 0) = T_0(\mathbf{X}), \mathbf{X} \in \bar{\Omega}, \quad (10)$$

$$\begin{aligned}
 & \left(\frac{R\gamma a_0}{1+(R-1)\xi} + \beta(1+e)\gamma \right) \frac{\partial h_0}{\partial t} = \\
 & = (1+e) \nabla \cdot (\mathbf{K}_h(c_0, T_0, h_0) \nabla h_0) - \mathbf{K}_c(c_0) \nabla c_0 - \mathbf{K}_T \nabla T_0 - \\
 & - \frac{R\gamma a_1 \beta_1}{1+(R-1)\xi} h_0 + \frac{a_0}{1+(R-1)\xi} \left(\frac{\partial \Theta_0^*}{\partial t} + R \frac{\partial p_0^*}{\partial t} \right) + \\
 & + \frac{a_1 \beta_1}{1+(R-1)\xi} (\Theta_0^* + R p_0^*), \mathbf{X} \in \bar{\Omega}, t = 0, \quad (11)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \frac{dl(x, y, t)}{dt} = \frac{R\gamma}{(1+\bar{e})(1+(R-1)\xi)} \times \\
 & \times \int_{\varphi(x, y)}^{l(x, y, t)} \left(a_0 \left(\frac{\partial h}{\partial t} - \frac{\partial h^*}{\partial t} - \frac{1}{R\gamma} \frac{\partial \Theta^*}{\partial t} \right) + \right. \\
 & + \frac{a_1 \beta_1}{\gamma} \left(p(t) - p^*(t) - \frac{\Theta^*(t)}{R} \right) + \\
 & \left. + \frac{a_1 \beta_1^2}{\gamma} \int_{\tau_1}^t \left(\frac{\Theta^*(t)}{R} + p^*(t) - p(t) \right) \exp(-\beta_1(t-\tau)) d\tau \right) dz; \quad (12)
 \end{aligned}$$

де $t \in (0; t_0]$; $\bar{\Omega} = \Omega \cup \Gamma$, $\Gamma = \Gamma_1 \cup \Gamma_2 = \Gamma_3 \cup \Gamma_4 = \Gamma_5 \cup \Gamma_6$, $\Gamma_1 \cap \Gamma_2 = \emptyset$, $\Gamma_3 \cap \Gamma_4 = \emptyset$, $\Gamma_5 \cap \Gamma_6 = \emptyset$, $C_1(\mathbf{X}, t)$, $T_1(\mathbf{X}, t)$, $H_1(\mathbf{X}, t)$, $h_0(\mathbf{X})$, $c_0(\mathbf{X})$, $T_0(\mathbf{X})$ - задані функції; R - розмірність задачі; $\mathbf{X} = x$ при $R = 1$, $\mathbf{X} = (x, y)$ при $R = 2$, $\mathbf{X} = (x, y, z)$ при $R = 3$. Тут використано такі позначення: $h(\mathbf{X}, t)$ - надлишкові напори; $c(\mathbf{X}, t)$ - концентрація порового сольового розчину; $T(\mathbf{X}, t)$ - температура; $\mathbf{K}_h(c, T, h) = \{k_{ij}^{(h)}(c, T, h)\}$, $\mathbf{K}_c(c) = \{k_{ij}^{(c)}(c)\}$, $\mathbf{D}_c(c, T, h) = \{D_{ij}^{(c)}(c, T, h)\}$, $\mathbf{D}_T = \{D_{ij}^{(T)}\}$, $\mathbf{K}_T = \{k_{ij}^{(T)}\}$, $\lambda(c, T) = \{\lambda_{ij}(c, T)\}$, $i, j = \overline{1, 3}$, - тензори відповідно коефіцієнтів фільтрації, хімічного осмосу, конвективної дифузії, термодифузії, термоосмосу та ефективної теплопровідності вологого ґрунту; \mathbf{u} , \mathbf{v} , \mathbf{q}_c , \mathbf{q}_T - вектори швидкостей фільтрації сольового розчину та руху твердих частинок ґрунту, потоків розчинених солей і тепла, відповідно; \mathbf{n} - вектор напрямних косинусів зовнішньої нормалі до межі області фільтраційної консолідації; a_0 , a_1 , β_1 - параметри повзучості скелета ґрунту; β - коефіцієнт об'ємної стискуваності порового газу; ρ , c_p - густина та питома теплоємність порового розчину; c_T - об'ємна теплоємність ґрунту за постійного об'єму; t - час; e - коефіцієнт пористості; γ - питома вага сольового розчину; n - пористість ґрунту; ξ - коефіцієнт бокового тиску ґрунту; γ_m - константа швидкості масообміну; C_m - концентрація граничного насичення.

Кінематична гранична умова (12) описує зміну з часом положення верхньої рухомої межі області консолідації, яка (рухома межа) задається рівнянням $z = l(x, y, t)$. Тут функція $z = \varphi(x, y)$ задає нижній нерухомий контур області консолідації. Функції Θ^* , h^* , p^* - suma головних напружень у скелеті ґрунту, надлишкові напори та тиск в поровому розчині в умовах миттєвої консолідації згідно основної розрахункової моделі Флоріна [3]. Теоретично вони вважаються відомими. Але на практиці, особливо в дво- та тривимірних задачах, для їх визначення потрібно проводити додаткові дослідження.

3. Чисельне розв'язання. Для чисельного розв'язання задачі (1)-(12) безсітковим методом радіальних базисних функцій (РБФ) покриємо

замикання області $\bar{\Omega} = \Omega \cup \Gamma$ вузлами-центраторами \mathbf{X}_i , $i = \overline{1, s}$ та колокаційними точками \mathbf{Y}_i , $i = \overline{1, k}$, де: k^Ω , k^{Γ_j} - відповідно множини номерів колокаційних точок, які лежать в області Ω і на відповідних частинах Γ_j , $j = \overline{1, 6}$, межі Γ . Вимагаємо $k \geq s$. В загальному випадку множини вузлових точок \mathbf{X}_i , $i = \overline{1, s}$ та колокаційних точок \mathbf{Y}_i , $i = \overline{1, k}$ не співпадають.Хоча, при практичній реалізації методу, такий випадок не виключається. Також відмітимо наступне. Наближені розв'язки для різних невідомих функцій можна шукати на різних сітках вузлових та колокаційних точок. Для уникнення зайвої індексації та громіздкості викладки зроблені для випадку однієї сітки, що не зменшує їх (викладок) загальності.

Наближений розв'язок крайової задачі (1)-(12) шукаємо у вигляді

$$\begin{aligned} h(\mathbf{X}, t) &\approx \sum_{i=1}^s h_i(t) \varphi_i(r_i, \varepsilon_h), \quad c(\mathbf{X}, t) \approx \sum_{i=1}^s c_i(t) \varphi_i(r_i, \varepsilon_c), \\ T(\mathbf{X}, t) &\approx \sum_{i=1}^s T_i(t) \varphi_i(r_i, \varepsilon_T), \end{aligned} \quad (13)$$

де $h_i(t)$, $c_i(t)$, $T_i(t)$, $i = \overline{1, s}$, - невідомі коефіцієнти, які залежать лише від часу; $\varphi_i(r_i, \varepsilon)$, $i = \overline{1, s}$, - відомі РБФ [11-13], причому $r_i = \|\mathbf{X} - \mathbf{X}_i\|_2$; $\varepsilon_h > 0$, $\varepsilon_c > 0$, $\varepsilon_T > 0$ - параметри форми; $\|\bullet\|_2$ - Евклідова норма вектора.

Тоді, використовуючи метод колокацій в точці [5, 7, 8], з рівнянь (1)-(3), граничних та початкових умов (7)-(11) отримуємо задачу Коші

$$\mathbf{M}^{(3)} \cdot \frac{d\mathbf{T}}{dt} + \mathbf{L}^{(3)}(\mathbf{h}, \mathbf{C}, \mathbf{T}) \cdot \mathbf{T} = \mathbf{F}^{(3)}, \quad (14)$$

$$\mathbf{M}^{(2)} \cdot \frac{d\mathbf{C}}{dt} + \mathbf{L}^{(2)}(\mathbf{h}, \mathbf{C}, \mathbf{T}) \cdot \mathbf{C} = \mathbf{L}^{(21)} \cdot \mathbf{T}(t) + \mathbf{F}^{(2)}, \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{Q}^{(1)} \cdot \frac{d^2\mathbf{h}}{dt^2} + \mathbf{M}^{(1)} \cdot \frac{d\mathbf{h}}{dt} + \mathbf{L}^{(1)}(\mathbf{C}, \mathbf{T}, \mathbf{h}) \cdot \mathbf{h}(t) &= \mathbf{L}^{(12)} \cdot \mathbf{C}(t) + \\ + \mathbf{L}^{(13)} \cdot \mathbf{T}(t) + \mathbf{M}^{(12)} \cdot \frac{d\mathbf{C}}{dt} + \mathbf{M}^{(13)} \cdot \frac{d\mathbf{T}}{dt} + \mathbf{F}^{(1)}, & \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{M}^{(0)} \cdot \frac{dh^{(0)}}{dt} + \mathbf{L}^{(0)}(\mathbf{C}^{(0)}, \mathbf{T}^{(0)}, \mathbf{h}^{(0)}) \cdot \mathbf{h}^{(0)} &= \\ = \mathbf{L}^{(01)} \cdot \mathbf{C}^{(0)} + \mathbf{L}^{(02)} \cdot \mathbf{T}^{(0)} + \mathbf{F}^{(0)}, & \end{aligned} \quad (17)$$

$$\tilde{\mathbf{M}}^{(1)} \cdot \mathbf{h}^{(0)} = \tilde{\mathbf{F}}^{(1)}, \quad \tilde{\mathbf{M}}^{(2)} \cdot \mathbf{C}^{(0)} = \tilde{\mathbf{F}}^{(2)}, \quad \tilde{\mathbf{M}}^{(3)} \cdot \mathbf{T}^{(0)} = \tilde{\mathbf{F}}^{(3)}. \quad (18)$$

для системи нелінійних диференціальних рівнянь відносно векторів невідомих $\mathbf{h}(t) = \{h_i(t)\}_{i=1}^s$, $\mathbf{C}(t) = \{c_i(t)\}_{i=1}^s$, $\mathbf{T}(t) = \{T_i(t)\}_{i=1}^s$, де

$$\begin{aligned} \mathbf{h}^{(0)} &= (h_i(0))_{i=1}^s, \quad \mathbf{C}^{(0)} = (c_i(0))_{i=1}^s, \quad \mathbf{T}^{(0)} = (T_i(0))_{i=1}^s, \\ \mathbf{M}^{(\alpha)} &= (m_{ij}^{(\alpha)})_{i,j=1}^{k,s}, \quad \alpha = \overline{0, 3}; \quad \mathbf{L}^{(s)} = (l_{ij}^{(s)})_{i,j=1}^k, \\ \mathbf{F}^{(s)} &= (f_i^{(s)})_{i=1}^k, \quad \alpha = \overline{0, 3}; \quad \mathbf{L}^{(21)} = (l_{ij}^{(21)})_{i,j=1}^{k,s}; \\ \mathbf{Q}^{(1)} &= (q_{ij}^{(1)})_{i,j=1}^{k,s}; \quad \mathbf{M}^{(1\alpha)} = (m_{ij}^{(1\alpha)})_{i,j=1}^{k,s}; \\ \mathbf{L}^{(1\alpha)} &= (l_{ij}^{(1\alpha)})_{i,j=1}^{k,s}, \quad \alpha = 2, 3; \quad \mathbf{L}^{(0\alpha)} = (l_{ij}^{(0\alpha)})_{i,j=1}^{k,s}, \\ \alpha &= 1, 2; \quad \tilde{\mathbf{M}}^{(\alpha)} = (\tilde{m}_{ij}^{(\alpha)})_{i,j=1}^{k,s}, \quad \tilde{\mathbf{F}}^{(\alpha)} = (\tilde{f}_i^{(\alpha)})_{i=1}^k, \\ \alpha &= \overline{0, 3}. \end{aligned}$$

Елементи матриць задачі Коші (14)-(18) визначаються однотипно, але досить громіздко. Так для системи рівнянь (14), яка відповідає рівнянню тепlopровідності (3), маємо

$$\begin{aligned} m_{ij}^{(3)} &= \begin{cases} c_T \varphi_j(r_{ji}, \varepsilon_T), & i \in k^\Omega; \\ 0, & i \notin k^\Omega; \end{cases} \\ l_{ij}^{(3)} &= \begin{cases} -\nabla \cdot (\lambda \nabla \varphi_j(r_{ji}, \varepsilon_T)) + \\ + \rho c_p \mathbf{u} \nabla \varphi_j(r_{ji}, \varepsilon_T), & i \in k^\Omega; \\ (-\lambda \nabla \varphi_j(r_{ji}, \varepsilon_T) + \\ + \rho c_p \mathbf{u} \cdot \varphi_j(r_{ji}, \varepsilon_T), \mathbf{n}), & i \in k^{\Gamma_5}; \\ \varphi_j(r_{ji}, \varepsilon_T), & i \in k^{\Gamma_6}; \end{cases} \\ f_i^{(3)} &= \begin{cases} 0, & i \in k^\Omega; \\ 0, & i \in k^{\Gamma_5}; \quad r_{ji} = \|\mathbf{Y}_i - \mathbf{X}_j\|_2. \\ T_1(\mathbf{Y}_i, t), & i \in k^{\Gamma_6}; \end{cases} \end{aligned}$$

Чисельний розв'язок вищепередованої задачі Коші можна знайти, використовуючи її дискретизацію згідно повністю неявної різницевої схеми, лінійної відносно шуканих функцій [4, 5].

3. Результати чисельних експериментів та висновки. Розглянемо процес фільтраційної консолідації шару двофазного глинистого ґрунту товщиною $l = 25\text{m}$, в якого верхня та нижня межі дреновані. Вважаємо, що ґрунт зверху змочений розчином солі з концентрацією граничного насичення $C_m = 350 \text{ g/l}$. На верхню межу ґрунту рівномірно прикладається миттєве зовнішнє навантаження інтенсивністю $q = 20 \cdot 10^4 \frac{\kappa \sigma}{M^2 \cdot \text{добра}^2}$. Тоді $h^* = 0$, $p^* = 0$, $\Theta^* = \frac{q}{\gamma}$ [1]. Початковий розподіл концентрації візьмемо $C_0(x) = \begin{cases} C_m, & x = 0 \\ 5 \text{ g/l}, & x \neq 0 \end{cases}$, а температури $-T_0(x) = \begin{cases} 20^\circ\text{C}, & x = 0 \\ 4^\circ\text{C}, & x \neq 0 \end{cases}$. Значення решти вхідних

$$\begin{aligned} \text{даніх беремо наступними: } & e = 0,67, \\ & \gamma = 10^4 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{добра}^2}, \quad a_0 = 0,5 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^2}{\text{кг}}, \\ & a_1 = 0,3 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^2}{\text{кг}}, \quad k_T = 2,8 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^2}{\text{град} \cdot \text{добра}}, \\ & \rho = 1100 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}, \quad c_T = 2,100 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3 \cdot \text{град}}, \\ & k_c = 2,8 \cdot 10^{-5} \frac{\text{м}^{-5}}{\text{кг} \cdot \text{добра}}, \lambda = 108 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{м} \cdot \text{град} \cdot \text{добра}}. \end{aligned}$$

Кінематична гранична умова (12) на верхній рухомій межі набуває вигляду

$$\begin{aligned} \frac{dl}{dt} = -\frac{\gamma}{1+e} \int_{l(x,t)}^l \left(a_0 \frac{\partial h}{\partial t} + a_1 \beta_1(h(x,t)) - \frac{q}{\gamma} + \right. \\ \left. + a_1 \beta_1^2 \int_0^t \left(\frac{q}{\gamma} - h(x,\tau) \right) e^{-\beta_1(t-\tau)} d\tau \right) dx. \end{aligned}$$

Залежність коефіцієнта фільтрації від температури та концентрації солей взята з робіт [4, 5].

Як видно з рис.1, у випадку врахування повзучості скелету ґрунту надлишкові напори розсіюються повільніше, ніж у випадку без врахування повзучості скелету ґрунту. В підобластях великих надлишкових напорів повзучість скелету ґрунту практично на них не впливає. Дане явище пояснюється тим, що врахування повзучості приводить до поступового зменшення тисків в поровій рідині і до поступового (а не миттєвого) збільшення напружень в скелеті ґрунту.

З рис. 2 можна зробити висновок, що майже у всій області масиву ґрунту напори розсіюються повільніше у випадку урахування впливу солей та температури. Це можна пояснити залежністю коефіцієнта фільтрації від концентрації солей. При збільшенні концентрації солей до 50 г/літр коефіцієнт фільтрації починає різко зменшуватись.

На рис. 3 наведено графіки просідань верхньої межі масиву ґрунту для різних випадків: 1) з урахуванням повзучості та тепло-масопереносу; 2) без урахування повзучості, з урахуванням тепло-масопереносу; 3) з урахуванням повзучості, без урахування тепло-масопереносу; 4) з урахуванням повзучості та теплопереносу; 5) з урахуванням повзучості та масопереносу. Дані графіків на рис. 3 свідчать про те, що при врахуванні повзучості скелету ґрунту величина просідань верхньої межі зменшується в середньому на 7%. Це відбувається за рахунок того, що при врахуванні повзучості скелет ґрунту

деформується в часі поступово (а не миттєво), через що його просідання сповільнюється. Найбільшою величина просідань стає при врахуванні повзучості скелету ґрунту та без впливу тепло-масопереносу. Пояснюється це явищем, що у вказаному випадку надлишкові напори розсіюються найшвидше.

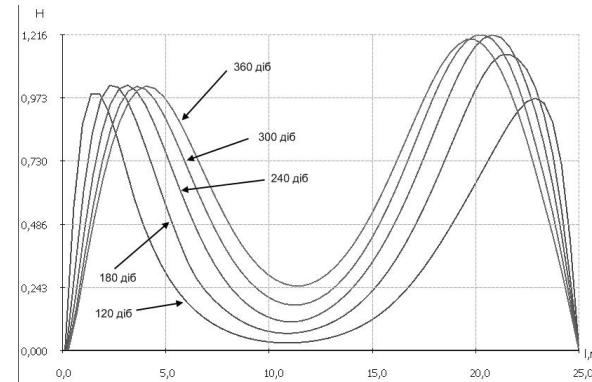


Рис.1. Графіки різниці між розподілом надлишкових напорів в умовах тепло-масопереносу з врахуванням та без врахування повзучості скелету

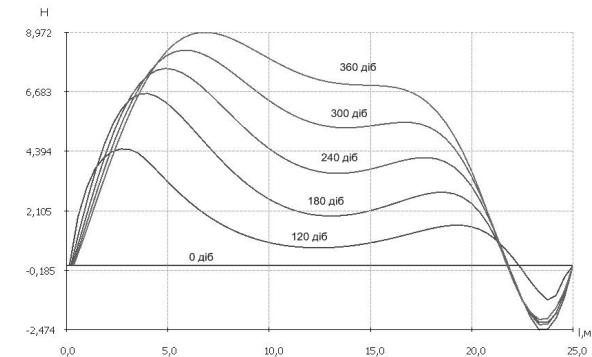


Рис.2. Графіки різниці між розподілом надлишкових напорів з врахуванням та без врахування тепло-масопереносу

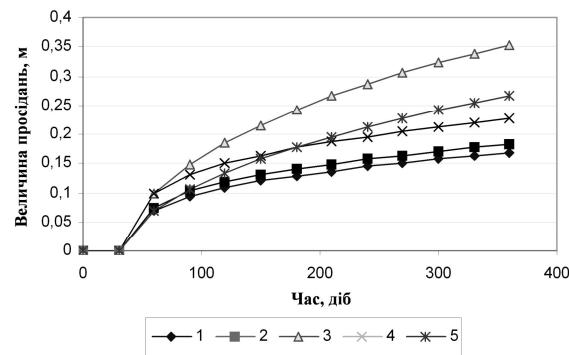


Рис.3. Графіки просідань верхньої межі ґрунту

Отже, в даній статті поставлена і чисельно розв'язана задача про вплив повзучості скелету на фільтраційну консолідацію ґрунту в умовах тепло-солепереносу. Як свідчать результати чисельного експерименту, ступені розсіювання надлишкових напорів залежать від врахування чи не врахування вказаних факторів. Подальшого дослідження вимагають дво- та тривимірні задачі.

Список використаних джерел

1. *Ivanov P.L.* Soils and foundation of hydrotechnical construction. Soil mechanics. – Moscow: Vyshaya shkola, 1991. – 447 p. (in Russian).
2. *Tsytovich N.A., Zaretsky Yu.K., Malyshev M.V., Abelev M. Yu., Ter-Martirosyan Z.G.* Prediction of settlement rate of structure bases. – Moscow: GosStroyIzdat, 1967. – 237 p. (in Russian).
3. *Florin V.A.* Base of soil mechanics. V. II. – Moscow: GosStroyIzdat, 1961. – 543 p. ((in Russian).
4. *Vlasyuk A. P., Martinyuk P. M.* Mathematical modeling of soil filtration consolidation under filtration of saline fluid in unisothermal conditions. – Rivne: NUVGP, 2008. – 416 p. (in Ukrainian).
5. *Vlasyuk A. P., Martinyuk P. M.* Numerical solution of consolidation problem and filtration destruction of soil in conditions of heat and mass transfer by radial basis functions method. – Rivne: NUVGP, 2010. – 277 p. (in Ukrainian).
6. *Vlasyuk A. P., Martinyuk P. M., Fursovych O. R.* Numerical solution of a one-dimensional problem of filtration consolidation of saline soils in a nonisothermal regime // Journal of Mathematical Sciences. – 2009. – Vol. 160, №4. – P. 525-535.
7. *Vlasyuk A. P., Martinyuk P. M.* Numerical solution of three-dimensional problems of filtration consolidation with regard for the influence of technogenic factors by the method of radial basis functions // Journal of Mathematical Sciences. – 2010. – Vol. 171, №5. – P. 632-648.
8. *Vlasyuk A. P., Martinyuk P. N.* Filtration consolidation of three-phase soils taking into account skeleton creep and the effect of salt transfer in a nonisothermal regime // Mat. Model. – 2010. – 22(4). – P. 32-56. (in Russian).
9. *Vlasyuk A. P., Martinyuk P. M.* The mathematical modeling of soil consolidation with taking into account nonlinear Darcy law, heat and salt transfer // Visn., Ser. Fiz.-Mat. Nayky, Ky'iv Univ. im. Tarasa Shevchenka. – 2012. – N 1. – P. 125-130. (in Ukrainian).
10. *Vlasyuk A. P., Martinyuk P. N.* The soil wash-out and filtration consolidation problem taking into account the salt and heat transfer // Mat. Model. – 2012. – 24(11). – P. 97-112. (in Russian).
11. *Buhmann M.D.* Radial Basis Functions: Theory and Implementations. – Cambridge: Cambridge University Press, 2004. – 260 p.
12. *Iske A.* Radial basis functions: basics, advanced topics and meshfree methods for transport problems // Rend. Sem. Mat. Univ. Pol. Torino. –2003. -Vol. 61, 3.– Pp.247-284.
13. *Wendland H.* Scattered Data Approximation. - Cambridge: Cambridge University Press, 2005. – 336 p.

Надійшла до редколегії 25.02.13